

乌兰布和沙漠典型沿黄段格状沙障防风固沙效应

马泽¹, 蒙仲举¹, 罗建国², 阿拉腾陶格苏³, 赵东颖¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.鄂托克前旗林业生态保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 016200; 3.鄂尔多斯市地质调查监测院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: [目的] 探究乌兰布和沙漠典型沿黄段机械沙障的固沙效果, 为沙区沿黄段的沙障合理配置及应用提供理论支撑和科学参考。[方法] 以 2 m×2 m 规格的纱网沙障、聚乳酸(PLA)沙障、麦草沙障为研究对象, 通过测定格状沙障近地表 10, 20, 50, 100 和 200 cm 处的风速, 同步收集近地表 0—50 cm 处的风蚀物颗粒, 对 3 种格状沙障在形成稳定障面后的防风固沙效应进行研究。[结果] ①纱网沙障、PLA 沙障和麦草沙障均有效降低了近地表风速, 尤以距地表 10 cm 高度处最为明显。在 10.32 m/s 风速下, 其防风效能分别达到了 49.73%, 39.92% 和 38.33%。②PLA 沙障的风速廓线呈现 S 形曲线特征, 3 种沙障的粗糙度均较裸沙丘有较大提升。③与裸沙丘相比, 3 种沙障降低了近地表 10 cm 处风的扰动度。④纱网沙障、PLA 沙障和麦草沙障的输沙率随高度均呈指数关系, 固沙效应分别为 94.37%, 44.80% 和 53.16%。3 种沙障相较于裸沙丘有效抬升了沙粒的平均跃移高度, 纱网沙障提升为对照的 5.35 倍。[结论] 根据乌兰布和沙漠沿黄段风沙活动程度及材料可获取性, 建议从河岸向流动沙丘依次布设麦草沙障固沙, 聚乳酸纤维沙障固沙促生, 纱网沙障防风固沙, 实现 3 种格状沙障防风固沙综合效益的最大发挥。

关键词: 格状沙障; 稳定障面; 防风固沙; 风的扰动度; 乌兰布和沙漠

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0001-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 马泽, 蒙仲举, 罗建国, 等. 乌兰布和沙漠典型沿黄段格状沙障防风固沙效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 1-10. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.001; Ma Ze, Meng Zhongju, Luo Jianguo, et al. Wind-prevention and sand fixation effects of checkerboard sand barrier along typical Yellow River bank in Ulan Buh Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 1-10.

Wind-prevention and Sand Fixation Effects of Checkerboard Sand Barrier Along Typical Yellow River Bank in Ulan Buh Desert

Ma Ze¹, Meng Zhongju¹, Luo Jianguo², Alatengtaoges³, Zhao Dongying¹

(1. College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Forestry Ecological Protection Center of Otog Front Banner, Ordos, Inner Mongolia 016200, China; 3. Ordos Geological Survey and Monitoring Institute, Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: [Objective] The sand fixation effects of mechanical sand barrier along typical Yellow River bank in Ulan Buh Desert were studied in order to provide theoretical supports and scientific references for the rational configuration and application of sand barriers in the desert areas along the Yellow River. [Methods] Checkerboard sand barriers comprised of 2 m×2 m gauze, polylactic acid (PLA), and straw were evaluated. Measurements of wind speed at heights of 10, 20, 50, 100, and 200 cm above the three checkerboard sand barrier treatments and the simultaneous collection of aeolian dust from 0 to 50 cm near the surfaces were used to determine the effects of three types of sand barrier on wind prevention and sand fixation after forming a stable barrier surface. [Results] ① The sand barriers of gauze, PLA, and straw all effectively reduced the near-surface wind speed, especially at the height of 10 cm. When the wind speed was 10.32 m/s, the wind protection efficiency of the three sand barriers reached 49.73%, 39.92%, and 38.33%, respectively. ② The wind speed profile of the PLA sand barrier had an S-shaped curve, and the roughness of the three types of sand barriers was greater than observed for the bare dune. ③ Compared with the bare dune, the three types

收稿日期: 2023-08-09

修回日期: 2023-10-09

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“黄河沿岸流动沙丘固定及风沙阻断技术研究与示范”(2022YFHH0076)

第一作者: 马泽(1999—), 男(满族), 内蒙古自治区通辽市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 792111938@qq.com。

通信作者: 蒙仲举(1980—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治方面的研究。Email: mengzhongju@126.com。

of sand barriers reduced the degree of wind disturbance at the height of 10 cm above the surface. ④ The sediment transport rate of the gauze, PLA, and straw sand barriers showed an exponential relationship with height, and the sand fixation effect was 94.37%, 44.80%, and 53.16%, respectively. Compared with the bare dune, these three types of sand barriers effectively elevated the average saltation height of sand grains, and the gauze sand barrier elevated to 5.35 times that of the control. [Conclusion] According to the degree of wind and sand activity along the Yellow River bank in Ulan Buh Desert, and the availability of sand barrier materials, it is suggested that, from the river bank to the mobile sand dunes, people should sequentially arrange straw sand barriers to fix sand, polylactic acid fiber sand barriers to fix sand and promote vegetation growth, and gauze sand barriers to prevent wind and fix sand. Therefore, the best comprehensive benefit of three kinds of checkerboard sand barriers to prevent wind and fix sand could be achieved.

Keywords: checkerboard sand barrier; stable barrier surface; wind prevention and sand fixation; degree of wind disturbance; Ulan Buh Desert

土地荒漠化是世界上最严重的环境问题之一,且严重制约着人类的发展^[1-2]。机械沙障在荒漠化治理中扮演着重要角色^[3],其中格状沙障应用最为广泛^[4]。从当前关于格状沙障在防风固沙方面的研究现状中发现,国内外学者的研究主要聚焦在沙障的材质、规格以及布设坡位等方面^[5-9],并认为沙障的材质、规格以及布设坡位是影响防护效益的关键因素^[10-12]。在沙障材质方面,材质结构的差异是决定防护效益的关键,不透风材质的沙障相比于疏透性沙障对近地表风沙流的改变更强烈。党晓宏等^[13]在格状沙障的防风研究中发现,不论是相同地形还是相同规格的对比中,聚乳酸纤维材质沙障的降低风速比率都要显著大于麦草沙障,且风速廓线也与裸沙和麦草沙障表现出显著差异。在障体材料相同时,防护效益主要取决于沙障规格、障体高度以及孔隙度等因素。闫德仁等^[14]在对 4 种规格纱网沙障的研究中发现,相同障体高度的纱网沙障规格越小,防风固沙能力越强。李凯崇等^[15]通过对不同孔隙度芦苇沙障的风洞试验中发现,当孔隙度范围在 28.6%~37.5%之间时,在现实工程应用中有较好的应用前景。张帅等^[16]基于风洞模拟试验,发现硬质、地高密度聚乙烯(HDPE)格状沙障在规格为 1 m×1 m,障高 30 cm、孔隙度为 50%时的防护效果最好。对于流动沙丘上布设的沙障,布设坡位的不同也会导致固沙效果产生差异。相较于坡中和丘间低地,沙丘顶部由于受地形对气流加速的影响会产生更强烈的风沙^[17]。周炎广等^[18]在对 9 种不同类型沙障的研究中发现,不论是沙障防护措施沙丘还是无防护措施的裸沙丘,输沙率都整体上呈现出由迎风坡脚向坡顶增加的趋势。合理地在流动沙丘布设沙障可以获取更大的经济效益与生态效益。石麟等^[8]认为,利用风力作用将沙丘顶部削平来恢复自然植被既可以起到防风固沙作用,同时也可以节约成本。

乌兰布和沙漠为黄河上游风沙入黄的主要区域^[19],黄河携带的大量沙物质主要是通过风沙流与沿岸沙丘移动进入河内^[20],因此沿黄流沙的固定为当前必须解决的问题^[21]。格状沙障作为一种高效的固沙措施,已吸引国内外学者开展了大量研究^[5-9],具有一定的指导意义。但已有的研究鲜有地从障区形成稳定障面的角度出发^[22],来揭示各类沙障在形成的稳定障面对流沙防风固沙的影响,而稳定障面对沙区长期的防风固沙效益是极其关键的。为此,本文在乌兰布和沙漠风沙入黄最前沿的流动沙丘上布设纱网、聚乳酸(PLA)以及麦草 3 种材质的沙障进行防风固沙研究,探讨各类沙障在形成稳定障面对沿黄流动沙丘防风固沙的影响,为实现荒漠化快速、高效、绿色治理提供理论基础与技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区阿拉善左旗东缘的阎王鼻子,毗邻黄河,为乌兰布和沙漠风沙入黄严重的区域,地理坐标为 40°04′26.40″N,106°45′21.12″E,东部与鄂尔多斯鄂托克旗相邻,南部紧邻乌海,平均海拔 800~1 500 m。该区属典型的温带大陆性气候,年降水量 80~220 mm,年蒸发量平均为 3 100 mm,年平均气温为 7.2℃。该区春季风沙活动最为强烈,夏秋季节相近且次于春季,冬季最为温和,主风害为西北风,年平均风速为 3.8 m/s,年平均起沙风速为 6.80 m/s,最大风速为 20.80 m/s,年平均起沙频率为 20%。该区为荒漠钙土带,土壤主要以风沙土、灰漠土和灌淤土为主。

当地植被主要有沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、藜子朴(*Inula salsoloides*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)、猪毛菜(*Kali collinum*)等。

2 材料与方法

2.1 样地布设

沙障布设在风沙入黄最前沿的沙丘迎风坡上(图1),沙丘走向为东北—西南,迎风坡平均坡度为 8.5° 。沙障于2021年4月布设完毕,以坡中上部的沙障为研究对象并以裸沙为对照(CK)。共布设3种类型的格状沙障,第1种为纱网沙障(GSB),障体高

15~20 cm,是近年研发的一种疏透型沙障,材质为聚乙烯,抗老化能力强;第2种为PLA沙障(PSB),障体高7~9 cm,是通过就地取沙灌入聚乳酸材质的柱状袋制作而成,是一种以沙治沙的方法,特点是可降解和耐老化;第3种为草方格沙障(SSB),障体高15~20 cm,该沙障是防沙治沙中最常见一种沙障,价格低廉,由当地的麦草和秸秆制成。沙障布设规格均为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 。

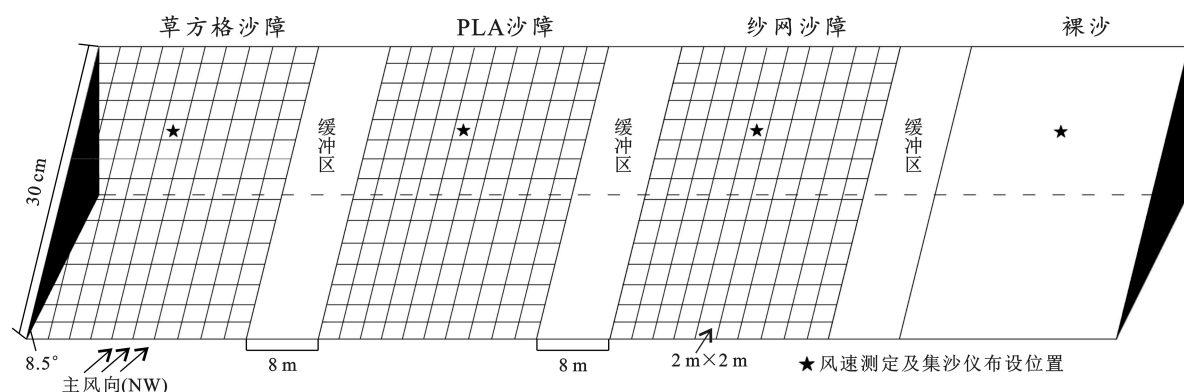


图1 沙障和仪器布设情况

Fig.1 Deployment of sand barriers and instruments

2.2 风沙观测

试验区的沙障于2021年4月铺设完毕,在铺设完毕后立即对铺设好沙障的下垫面进行风速观测。风速观测时间选在铺设完毕后的第一个典型春季大风日,测定时段旷野风速为 9.98 m/s 。观测地点选择在沙丘迎风坡中上部位的各类沙障区中央和附近的裸沙地(CK),各观测地点所处坡位一致。观测高度为10,20,50,100和200 cm,且各高度的风速观测均在障格中心部的上方进行,每个样地设置3组风速仪。风速记录间隔为2 s。第二次的风沙观测选择在2022年的3—5月典型的春季大风日,测定时段旷野风速为 10.02 m/s ,风向与2021年观测风向基本一致。此时铺设好的沙障下垫面经过一年的吹蚀,障内的曲面形态已经达到稳定阶段,再次对沙障下垫面进行风速测定(风速测定方式方法与2021年一致),来探明防风效益的变化。本试验采用美国Onset公司生产的HOBO-U30小型气象站进行风速采集。

输沙测定选择在翌年形成稳定侵蚀基准面时进行。输沙测定与风速观测同时进行,输沙测定时段旷野风速为 9.79 m/s 。在各样地的小型气象站附近布设自研式可旋转集沙仪(ZL201320703676.8),布设地点为障格中央,共布设4组集沙仪,并以裸沙(CK)为对照。集沙仪的高度为50 cm,2 cm为1层,共25层,集沙口规格为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 。收沙时记录好观测的

起止时间,在风沙活动最强烈的裸沙地段的集沙袋装满 $2/3$ 时停止集沙,收沙完毕后使用精度为 0.01 g 的天平进行称重,集沙试验共重复3次。

2.3 指标计算

(1) 地表粗糙度与摩阻流速。本研究采用普朗特—冯卡门的风速对数分布规律描述风速廓线方程为:

$$U_z = \frac{U_*}{K} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

式中: U_z 代表 Z 高度的平均风速(m/s); U_* 代表摩阻流速(m/s); Z 为风速廓线上某点距地面的垂直高度(cm); Z_0 为空气动力学粗糙度(cm); K 为卡门常数,取值 $0.4^{[23]}$ 。

本研究采用对数廓线拟合法计算地表粗糙度和摩阻流速,测得5个高度(0.1,0.2,0.5,1和2 m)的风速,通过最小二乘回归来获得风速廓线式 $^{[24-25]}$ 。计算公式为:

$$U_z = a + b \ln Z \quad (2)$$

式中: a, b 为回归系数。令 $U_z = 0$ 可求出地表粗糙度:

$$Z_0 = \exp(-a/b) \quad (3)$$

由公式(2)和(3)计算可得摩阻流速计算方程为:

$$U_* = Kb \quad (4)$$

(2) 防风效能。防风效能计算公式为:

$$F = \frac{V_0 - V_{sb}}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: F 为沙障的防风效能($\%$)^[26]; V_0, V_{sb} 分别代表同一高度下的裸沙风速和铺设各类沙障后的风速(m/s)。

(3) 风的扰动度^[27]。本文以各下垫面近地表 10 和 20 cm 高度 1 min 内的风速数据为研究对象, 以了解沙障对风的扰动度的影响, 其计算公式为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (V - \bar{V})^2}{N - 1}} \quad (6)$$

$$D = \frac{S}{\bar{V}} \quad (7)$$

式中: V 为在某段时间观测的一组风速数据($V_1, V_2, V_3, \dots$)(m/s); $\bar{V}$ 为该时段的平均风速(m/s); N 为该组风速数据的数量; S 为标准差; D 为风的扰动度。

(4) 固沙效应。固沙效应计算公式为:

$$E = \frac{q_0 - q_b}{q_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中: E 代表固沙效应($\%$)^[28]; q_0 代表裸沙地各个

高度的输沙率 $[\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})]$ 之和; q_b 代表沙障各个高度的输沙率之和。

2.4 数据处理

本次试验数据采用 Excel 2019 进行整理、计算, 采用 IBM SPSS Statistics 22 进行显著性分析, 采用 Origin 2023 进行分析、绘图。

3 结果与分析

3.1 沙障对近地表层气流的影响

3.1.1 各类沙障的风速廓线特征 格状沙障的铺设改变了地表微地形, 导致近地表过境风沙的能量结构发生变化, 从而对近地表的风速廓线产生影响。不同材质的沙障对风速廓线的影响也存在差异(图 2), PSB 的风速廓线并不同于 GSB 和 SSB 表现出简单的 J 形曲线, 而是呈现出 S 形变化特征。PSB 在近地表 20—50 cm 处的风速增加缓慢, 使风速廓线在该处的斜率出现明显增大, 当高度大于 50 cm 时, 风速又迅速恢复旷野风速使斜率变小。因此 PSB 的风速廓线呈现 S 形, 并且当 PSB 形成稳定障面后, 风速廓线的 S 形曲线更明显。

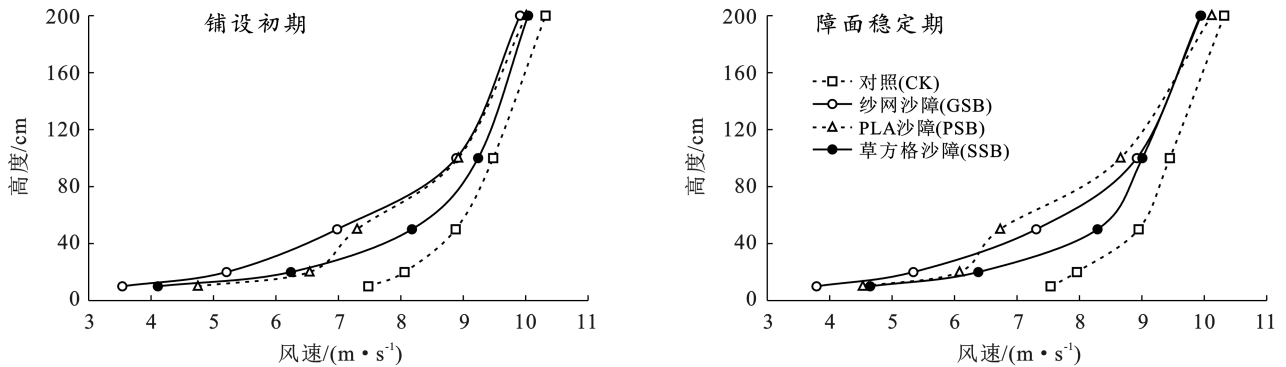


图 2 各类沙障不同时期的风速廓线

Fig.2 Wind speed profiles of various sand barriers in different periods

3.1.2 各类沙障的防风效能 3 种格状沙障对近地表的防风均起到了积极影响。如图 3 所示, 3 种沙障近地表 10 cm 处的防风效能均显著大于其他高度层($p < 0.05$)。在近地表 10 cm, 20 cm 高度处, GSB 的防风效能在这两时期均显著大于 PSB 和 SSB($p < 0.05$); 50 cm 高度处, SSB 在这两时期的防风效能均显著小于 GSB 和 PSB($p < 0.05$); 100 cm 高度处, 各沙障对风的影响较小。从沙障的不同时期来看, GSB 和 SSB 均在铺设初期的防风效果最好, 10 cm 处的防风效能分别为 52.67% 和 45.05%。在障面稳定期(图 4), GSB 在障后形成了堆积, SSB 的障体出现了破损和沙埋现象, 造成了沙障有效高度的降低, 同时出现 GSB 和 SSB 在障面稳定期的近地表防风效能低于铺设初期的情况。GSB 和 SSB 在近地表 10 cm 处的防风效能分

别较初期下降了 5.58% 和 14.92%。PSB 的防风效能在这两时期均有所提升, 在 50 cm 处提升最大, 达到了 24.80%, 较铺设初期提升了 39.4%。

如图 5 所示, 在障面稳定期, 各风速下, GSB 在 10 cm 和 20 cm 处的防风效能显著高于 PSB 和 SSB($p < 0.05$), PSB 在 50 cm 处的防风效能显著高于 GSB 和 SSB($p < 0.05$)。各类沙障不同风速下的防风效能也有所不同, GSB 的防风效能是在风速为 10.32 m/s 时最高, 10 cm, 20 cm 和 50 cm 处分别为 49.73%, 32.91% 和 18.32%; SSB 的防风效能是在风速为 7.94 m/s 时最高, 10 cm, 20 cm 和 50 cm 处分别为 42.23%, 20.44% 和 9.51%; PSB 的防风效能是在风速为 9.34 m/s 时最高, 在 10 cm, 20 cm 和 50 cm 处分别为 39.82%, 22.44% 和 26.67%。

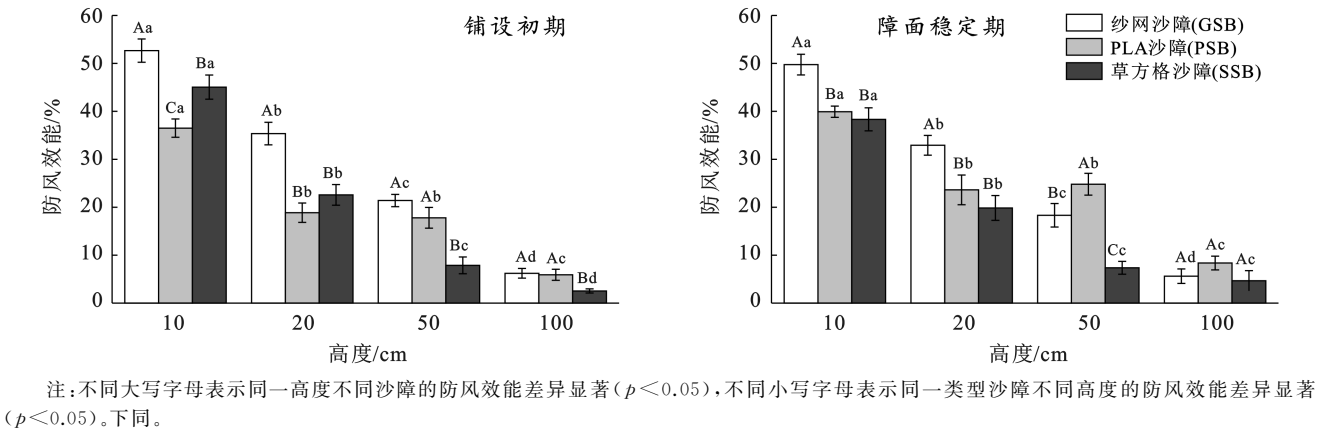


图 3 各类沙障不同时期的防风效能
Fig.3 Windproof efficiency of various sand barriers in different periods

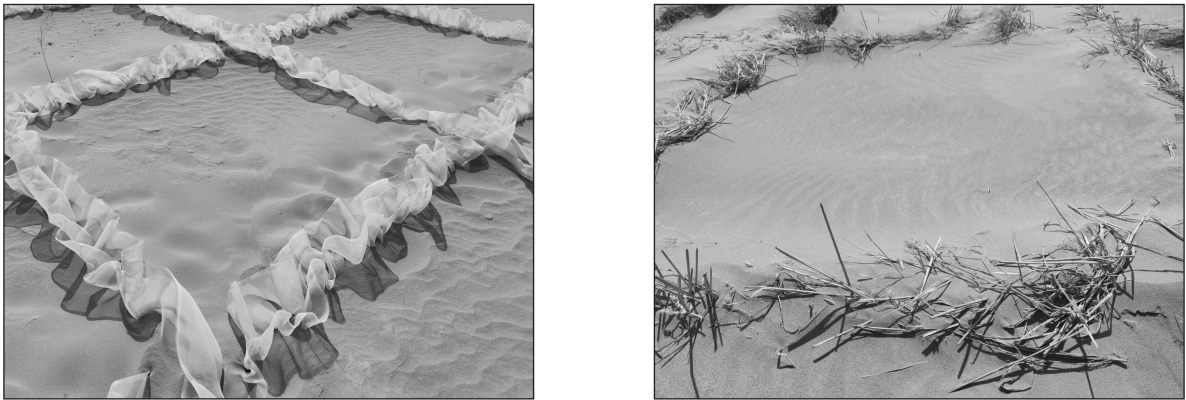


图 4 障面稳定期障体与障面情况
Fig.4 Barrier and barrier surface conditions during stabilization period

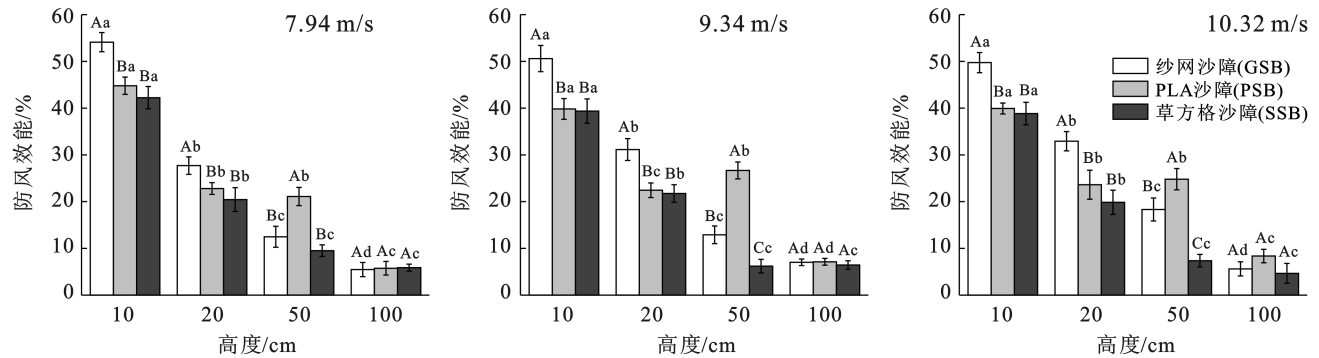


图 5 各类沙障在不同风速下的防风效能
Fig.5 Windproof efficiency of various sand barriers at different wind speeds

3.1.3 各类沙障的地表粗糙度和摩阻速度 如表 1 所示, 各类沙障的风速廓线均服从对数线性方程, 回归系数均大于 0.96。3 类沙障均有效提高了该地的粗糙度与摩阻流速, 其中 GSB 的提升效果更明显。从沙障的不同时期来看, GSB 和 SSB 在障面稳定期的粗糙度和摩阻流速较初期有所降低。当稳定障面形成后, GSB 的粗糙度与摩阻流速分别为 CK 的 523 和 2.25 倍; SSB 的粗糙度与摩阻流速分别为 CK 的

193 和 1.88 倍。PSB 在形成稳定凹曲面后的防护效益更高, 其粗糙度与摩阻流速分别为 CK 的 273 和 1.92 倍。当沙障形成稳定障面后, 各类沙障的粗糙度均随风速增加而减小, 摩阻流速均随风速增加而增加。在 7.94 m/s 风速下, GSB, PSB 和 SSB 的粗糙度分别为 CK 的 119.33, 80.67 和 64 倍; 10.32 m/s 风速下, GSB, PSB 和 SSB 的摩阻流速分别为 CK 的 2.25, 1.92 和 1.88 倍。

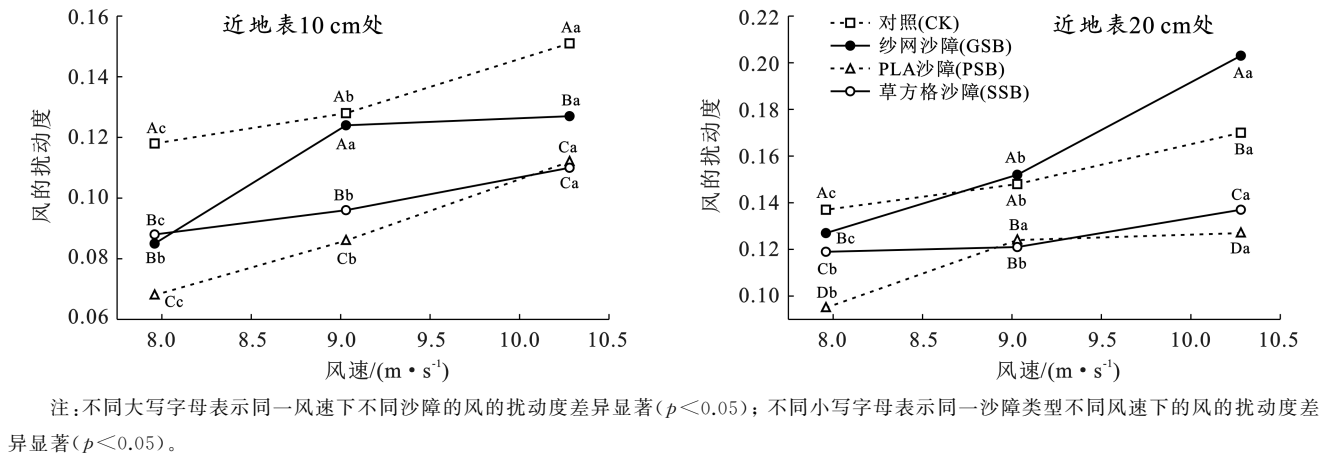
表 1 各类沙障在不同时期和不同风速下的粗糙度与摩阻速度

Table 1 Roughness and frictional velocity of each type sand barrier at different times and wind speeds

年份	风速/(m·s ⁻¹)	下垫面	风速廓线回归方程	粗糙度/cm	摩阻流速/(m·s ⁻¹)
2021	10.32	对照(CK)	$u=0.93 \ln(z)+5.28, R^2=0.99$	0.003	0.372
		纱网沙障(GSB)	$u=2.16 \ln(z)-1.35, R^2=0.99$	1.87	0.864
		PLA 沙障(PSB)	$u=1.69 \ln(z)+1.06, R^2=0.97$	0.53	0.676
		草方格沙障(SSB)	$u=1.96 \ln(z)+0.06, R^2=0.96$	0.97	0.784
2022	10.32	对照(CK)	$u=0.93 \ln(z)+5.30, R^2=0.99$	0.003	0.372
		纱网沙障(GSB)	$u=2.09 \ln(z)-0.94, R^2=0.99$	1.57	0.836
		PLA 沙障(PSB)	$u=1.79 \ln(z)+0.36, R^2=0.96$	0.82	0.716
		草方格沙障(SSB)	$u=1.75 \ln(z)+0.97, R^2=0.97$	0.58	0.7
2022	9.34	对照(CK)	$u=0.91 \ln(z)+4.52, R^2=0.99$	0.007	0.364
		纱网沙障(GSB)	$u=1.96 \ln(z)-1.01, R^2=0.99$	1.68	0.784
		PLA 沙障(PSB)	$u=1.66 \ln(z)+0.25, R^2=0.97$	0.86	0.664
		草方格沙障(SSB)	$u=1.69 \ln(z)+0.44, R^2=0.97$	0.77	0.676
2022	7.94	对照(CK)	$u=0.83 \ln(z)+3.49, R^2=0.99$	0.015	0.332
		纱网沙障(GSB)	$u=1.68 \ln(z)-0.98, R^2=0.96$	1.79	0.672
		PLA 沙障(PSB)	$u=1.51 \ln(z)-0.28, R^2=0.97$	1.21	0.604
		草方格沙障(SSB)	$u=1.48 \ln(z)+0.06, R^2=0.97$	0.96	0.592

3.1.4 各类沙障风的扰动度 在近地表 10 cm 处(图 6),PSB,SSB 和 CK 的风的扰动度随风速的增加而显著增强($p<0.05$)。除 GSB 在 9.03 m/s 风速时风的扰动度与 CK 差异不显著外($p>0.05$),其余各风速下,CK 的扰动度均显著高于各类沙障($p<0.05$)。大风时(10.28 m/s 风速时),GSB,PSB 和 SSB 的风的扰动度分别为 0.127,0.112,0.11,相较于 CK 分别降低了 15.89%,25.83%和 27.15%。由此可见,3 种类型沙障均对该地近地表 10 cm 处风的扰动度起到了

抑制作用。在近地表 20 cm 处(图 6),当风速为 9.03 m/s 和 10.28 m/s 时,GSB 的风的扰动度要高于 CK,且在 10.28 m/s 时更加显著($p<0.05$),为 CK 的 1.19 倍。与 CK 相比,PSB 与 SSB 在各风速条件下均显著降低了风对近地表的扰动($p<0.05$)。10.28 m/s 风速下,PSB 和 SSB 风的扰动度分别较 CK 降低了 25.29%和 19.41%。7.96 m/s 风速下,PSB 风的扰动度显著低于 SSB($p<0.05$)。10.28 m/s 风速下,SSB 风的扰动度显著低于 PSB($p<0.05$)。



注:不同大写字母表示同一风速下不同沙障的风的扰动度差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一沙障类型不同风速下的风的扰动度差异显著($p<0.05$)。

图 6 各类沙障的风的扰动度

Fig.6 Degree of wind disturbance of various sand barriers

3.2 沙障对近地表层输沙的影响

3.2.1 各类沙障的风沙流结构 图 7 为各类沙障的风沙流结构。如图 7 所示,各类沙障的风沙流曲线对

指数函数模型的拟合度最高,相关系数 R^2 均大于 0.95,说明利用指数函数能够很好地说明输沙率与高度之间的关系。GSB 的风沙流结构较 PSB,SSB 和

CK 有所差异,其 2—50 cm 的输沙率随高度的增加而上下变动,输沙率并未出现明显地随高度而减小的趋势,并且各高度输沙率较低。CK 的近地表输沙量高

于 3 种沙障措施,分别为 GSB,SSB 和 PSB 总输沙量的 17.77,2.13 和 1.81 倍。由此可见,GSB 在固沙方面有较大优势。

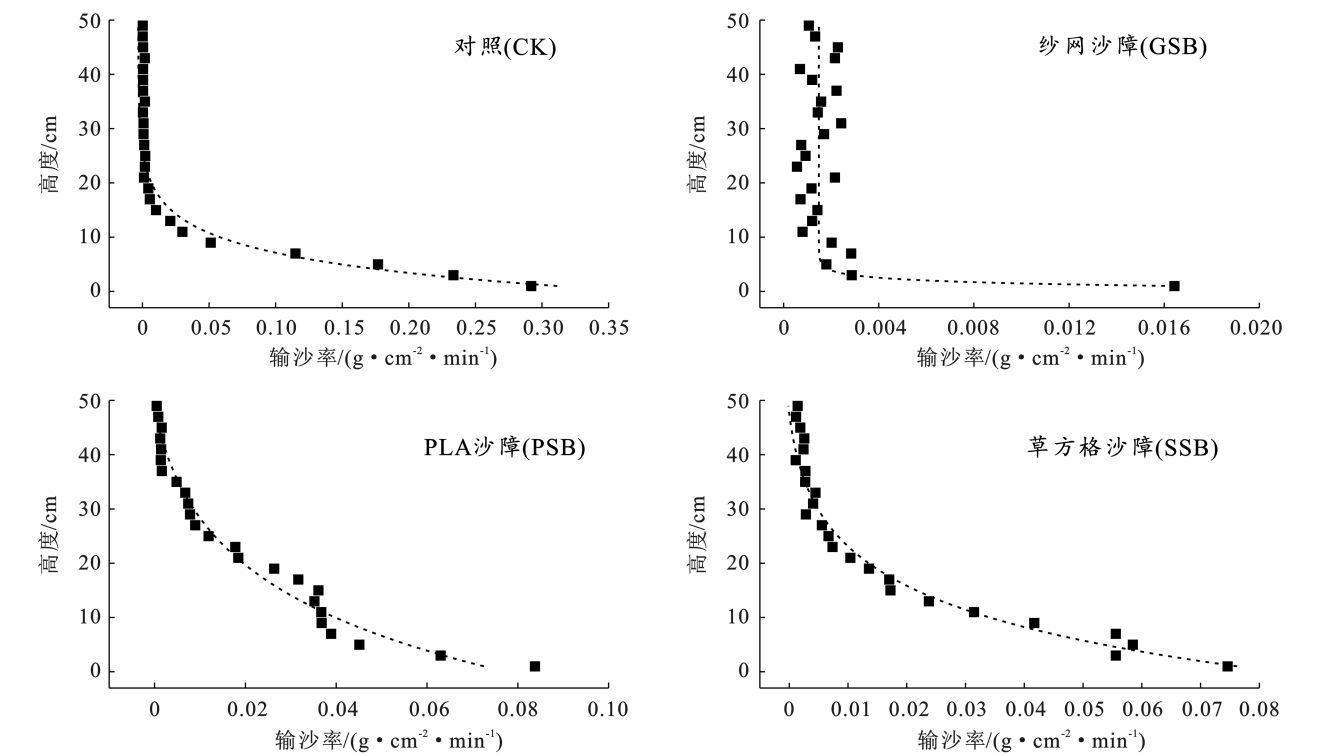


图 7 各类沙障的风沙流结构

Fig.7 Wind sand flow structure of various sand barriers

3.2.2 各类沙障的累计输沙率和固沙效应 如图 8 所示,GSB 的累计输沙率随高度呈线性关系,PSB,SSB 和 CK 的累计输沙率随高度呈指数关系, R^2 均为 0.99。通过累计输沙率与高度的拟合方程来确定累计输沙率为 50%时的高度,从而得到沙粒的平均跃移高度。CK 的平均跃移高度为 2.36 cm,而 GSB,PSB 和 SSB 分别为 12.63,7.92 和 6.07 cm。相较于 CK,3 类沙障均有效抬升了沙粒的平均跃移高度。CK 的输沙主要集中在近地表 0—10 cm 范围,10 cm 处的累计输沙量达到了总输沙量的 91.17%,GSB,SSB 和 PSB 在 10 cm 处的累计输沙量分别为总输沙量的 48.39%,64.09%和 36.79%。如表 2 所示,3 种沙障的铺设均对该地的固沙起到了积极作用,其中 GSB 的固沙效应最大,高达 94.37%。

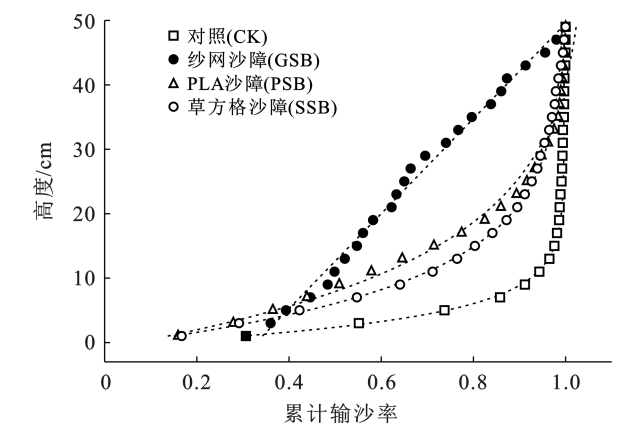


图 8 各类沙障的累计输沙率

Fig.8 Cumulative sand transport rate of various sand barriers

4 讨论

4.1 不同材质格状沙障对近地表风的影响 纱网沙障、PLA 沙障以及草方格沙障在经历强烈风沙活动后进一步改变了流动沙丘的物理结构特征,形成了稳定障面。本研究结果表明,由于障体材质的差异,导致 3 类沙障表现出不同的障面形态。纱

表 2 各类沙障的固沙效应

Table 2 Sand fixation effect of various sand barriers

下垫面	纱网沙障 (GSB)	PLA 沙障 (PSB)	草方格沙障 (SSB)
固沙效应/%	94.37	44.80	53.16

网沙障其障后形成堆积(图 4),进而导致障体有效高度降低,防风效果较铺设初期虽有所下降,但效果依旧明显,有效提升了该区地表粗糙度与摩阻流速。纱网沙障近地 10 cm 处防风效能达到了 49.73%,显著高于 PLA 沙障与草方格沙障($p < 0.05$)。该研究结果与闫德仁等^[14]一致,其研究结果认为纱网沙障所具备的随风摆动的特性可以对近地表风产生积极的扰动,摆动幅度越大,扰动越强烈。但对于其文中提到的扰动并未用量化的指标体现,本文引用风的扰动度指标对纱网沙障近地表风进行了分析。结果表明,在近地表 20 cm 处风的扰动度会随风速的增加而增强,同时防风效能也同扰动度表现同样的趋势。高天笑等^[29]所研究的羽翼袋沙障也具有随风摆动的特性,同样得出了防风效果随风速增加而更加明显的结论。PLA 沙障形成了四周高中间低的稳定凹面,相较于铺设初期更加促进了近地表风沙流的阻挡与抬升,从而使防风效能、粗糙度与摩阻流速较初期有所提升,其中近地表 50 cm 处的防风效能提升最大,较铺设初期提升了 39.4%。党晓宏等^[13]认为由于 PLA 沙障的不透风性和圆柱状形态会使风沙流表现独特的运动规律,一部分风沙会越过光滑的障体继续向障内运移,另一部分会与障体碰撞使风沙抬升,对近地表 50 cm 处的风产生影响。该因素也是本文中 PLA 沙障风速廓线呈现 S 形的关键。草方格沙障在铺设初期表现出较好的防风效果,该研究结果与王雨浩^[30]对铺设初期的沙障研究中的结果一致。本次研究的坡位为迎风坡中上部,相关研究^[17]表明,受地形气流加速影响,上坡位所产生的风沙活动会较下坡位更加强烈。草方格沙障的材质韧性远不如前两者,在

经历强烈的风沙后,障体必定会受到严重破损(图 4),进而导致防风效果的减弱,地表粗糙度与近地表 10 cm 处的防风效能分别较初期下降了 40.21%和 14.92%。周娜等^[31]认为,迎风坡中部风速较强,风沙流不饱和,因此草方格中心受侵蚀后易形成稳定的凹曲面。但本研究中并未发现障内形成明显曲面(图 4)。由于风沙流在作用于障面的同时也会对沙障自身产生作用,而且草方格沙障的障体材质韧性较低,因此沙障在受到长期风沙作用下破损后,必定会对形成的凹曲面产生影响。

4.2 不同材质格状沙障对近地表输沙的影响

研究结果显示,形成稳定障面后,3 类沙障的近地表输沙量均低于对对照样地。纱网沙障在 3 类沙障中固沙效果最明显,固沙效应达到了 94.37%,与闫德仁等^[32]在春季监测到的 96.32%基本一致。其研究结果表明纱网沙障随风摆动的特性不仅是影响防风效能的关键因素,同时也与纱网沙障高效的固沙能力具有一定的相关性。从纱网沙障的风沙流结构可以看出(图 7),纱网沙障的输沙曲线并不同于其余 2 类沙障一样平滑,而是出现输沙率随高度的升高而上下变动。在野外试验中发现纱网沙障的网后形成了厚度约为 1 cm 的物理结皮,结皮厚度在障内会随风向由上到下递减,在障前几乎不存在结皮(图 9),这是由于纱网会滤掉粗砂将其留在障前,细沙穿过纱网分布在障后并形成结皮。流沙固定被看作是物理结皮形成的前提^[33],由此可见纱网沙障在流沙固定方面有着独特的优势。在气候环境恶劣的沙漠地区,PLA 沙障凭借着使用寿命长、可完全降解以及方便运输铺设等特性,在防沙治沙领域一直起着不可或缺的作用^[34]。

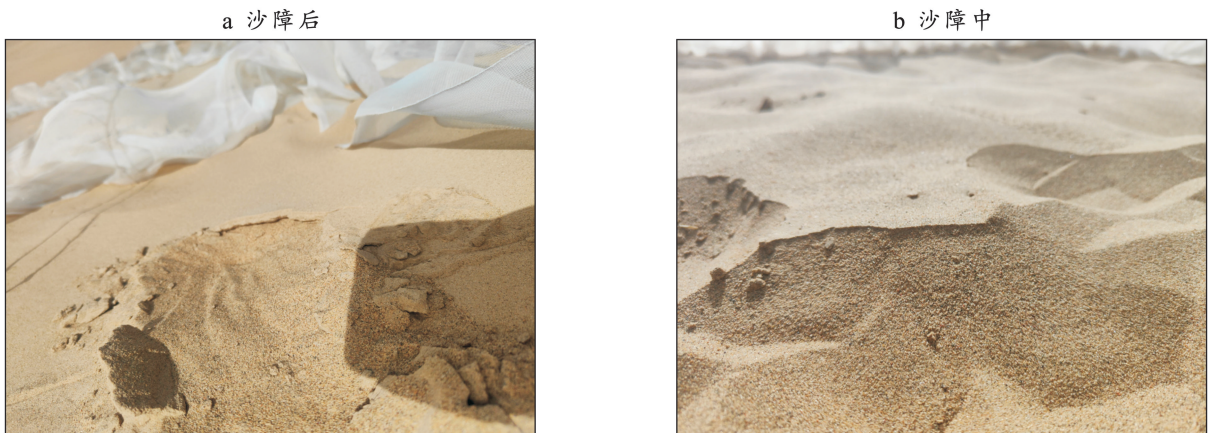


图 9 纱网沙障不同部位结皮厚度

Fig.9 Thickness of soil crusts in different parts of gauze sand barriers

本文研究结果显示,PLA 沙障有效降低了该地的近地表输沙量,但不同防风效果一样明显,这与周

炎广等^[18]的研究结果相似。石麟等^[8]认为,当上坡位较强输沙气流通过不透风沙障时,部分气流会受障

内微地形的影响向上抬升,表现出不稳定的拦沙效果。因此,从合适的坡位布设 PLA 沙障可以更大程度地发挥 PLA 沙障的优势。在王雨浩^[30]对铺设初期的草方格沙障研究中发现,草方格沙障具有良好的固沙效果。但本研究中发现草方格沙障的障体受损严重,障体高度严重降低,而障体高度是决定沙障防护效益的关键参数^[35],因此要保证草方格沙障固沙效益的持久性,就要定期补造沙障。

5 结论

(1) 铺设格状沙障后,均提高了地表粗糙度,沙粒的平均跃移高度有效提升。纱网沙障在形成稳定障面后,障体仍具有随风摆动的特性,能做到“以风治风”,可以更好地应对大风天气。PLA 沙障能形成的稳定的凹曲面,在后期防风效果优势更为明显。

(2) 根据乌兰布和沙漠沿黄段风沙活动程度及材料可获取性,建议从河岸向流动沙丘依次布设麦草沙障固沙,聚乳酸纤维沙障固沙促生,纱网沙障防风固沙,实现 3 种格状沙障防风固沙综合效益的最大发挥。

参考文献(References)

- [1] 朱震达.土地荒漠化问题研究现状与展望[J].地理研究, 1994,13(1):104-113.
Zhu Zhenda. Current status and prospects of land desertification problem [J]. Geographical Research, 1994,13(1): 104-113.
- [2] 朱震达,崔书红.中国荒漠化土地分布地域特征及其治理措施的评估[J].中国环境科学,1996,16(5):328-334.
Zhu Zhenda, Cui Shuhong. Features of distribution and assessment for control measures of desertification in China [J]. China Environmental Science, 1996,16(5):328-334.
- [3] 孙保平.荒漠化防治工程学[M].北京:中国林业出版社, 2000.
Sun Baoping. Desertification Control Project [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000.
- [4] 马鹏.格状沙障防风固沙技术研究[D].甘肃 兰州:兰州大学,2015.
Ma Peng. Research of checkerboard sand barrier sand-fixing technology [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2015.
- [5] Bo Tianli, Ma Peng, Zheng Xiaojing. Numerical study on the effect of semi-buried straw checkerboard sand barriers belt on the wind speed [J]. Aeolian Research, 2015,16(4):101-107.
- [6] Zhang Chunlai, Li Qing, Zhou Na, et al. Field observations of wind profiles and sand fluxes above the windward slope of a sand dune before and after the establishment of semi-buried straw checkerboard barriers [J]. Aeolian Research, 2016,20(1):59-70.
- [7] Xie Yunhu, Dang Xiaohong, Zhou Yujuan, et al. Using sediment grain size characteristics to assess effectiveness of mechanical sand barriers in reducing erosion [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):14009.
- [8] 石麟,李红悦,赵雨兴,等.毛乌素沙地流动沙丘不同沙障组合措施的防风固沙效益评价[J].干旱区研究,2023,40(2):268-279.
Shi Lin, Li Hongyue, Zhao Yuxing, et al. Benefit evaluation of wind prevention and sand fixation under the combined measures of sand barrier in mobile dunes in Mu Us sandy land [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 268-279.
- [9] 马瑞,王继和,屈建军,等.不同结构类型棉秆沙障防风固沙效应研究[J].水土保持学报,2010,24(2):48-51.
Ma Rui, Wang Jihe, Qu Jianjun, et al. Study on protective effect of difference types of cotton haulm sand barriers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 48-51.
- [10] 黄富祥,高琼.毛乌素沙地不同防风材料降低风速效应的比较[J].水土保持学报,2001,15(1):27-30.
Huang Fuxiang, Gao Qiong. Comparison of wind velocity reduced by seven different windproof materials in Maowusu sandland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 27-30.
- [11] 贾丽娜,丁国栋,吴斌,等.几种不同材料类型带状沙障防风阻沙效益对比研究[J].水土保持学报,2010,24(1):41-44.
Jia Lina, Ding Guodong, Wu Bin, et al. Effect of different material types of sand barrier on wind prevention and sand resistance [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 41-44.
- [12] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,2019,34(3):225-231.
Qu Jianjun, Ling Yuquan, Liu Baojun, et al. The research status and development trends of wind-sand engineering in China [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 225-231.
- [13] 党晓宏,高永,虞毅,等.新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益[J].北京林业大学学报,2015, 37(3):118-125.
Dang Xiaohong, Gao Yong, Yu Yi, et al. Windproof efficiency with new biodegradable PLA sand barrier and traditional straw sand barrier [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(3): 118-125.
- [14] 闫德仁,袁立敏,黄海广,等.直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J].中国沙漠,2020,40(2):79-85.
Yan Deren, Yuan Limin, Huang Haiguang, et al. Influence of gauze sand barrier on sediment transport and

- wind speed near surface [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2): 79-85.
- [15] 李凯崇, 谭立海, 石龙, 等. 孔隙率对芦苇沙障风沙防护效果影响分析[J]. *铁道学报*, 2022, 44(5): 166-170.
Li Kaichong, Tan Lihai, Shi Long, et al. Influence of porosity on blown sand protection effect of reed sand barrier [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(5): 166-170.
- [16] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 硬质地 HDPE 沙障防风效益的风洞试验[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(3): 127-133.
Zhang Shuai, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Wind tunnel test on windproof benefit of horniness HDPE sand barrier [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(3): 127-133.
- [17] Walker I J, Shugar D H. Secondary flow deflection in the lee of transverse dunes with implications for dune morphodynamics and migration [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14): 1642-1654.
- [18] 周炎广, 李红悦, 武子丰, 等. 毛乌素沙地沙障固沙机制与效益评估[J]. *科学通报*, 2023, 68(11): 1312-1329.
Zhou Yanguang, Li Hongyue, Wu Zifeng, et al. Sand fixation mechanism and effect evaluation of sand barriers in Mu Us sandy land, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(11): 1312-1329.
- [19] 田世民, 姚文艺, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄影响因子变化特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1701-1707.
Tian Shiming, Yao Wenyi, Guo Jianying, et al. Variation of impact factors on the aeolian sand blown into the Yellow River in the Ulanbuh Desert area [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1701-1707.
- [20] 杨根生, 刘阳宣, 史培军. 黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J]. *科学通报*, 1988, 1(13): 1017-1021.
Yang Gensheng, Liu Yangxuan, Shi Peijun. Estimation of the amount of sand entering the Yellow River along the Yellow River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(13): 1017-1021.
- [21] 胡平, 杨建英, 张艳, 等. 乌海市沿黄河两岸沙丘风沙流结构差异与冰面风沙特征[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 765-773.
Hu Ping, Yang Jianying, Zhang Yan, et al. Structure difference of wind sand flow and characteristics of wind sand on the ice surface of sand dunes on both sides of the Yellow River in Wuhai City [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(3): 765-773.
- [22] 韩雪莹, 王涛, 杨文斌, 等. 中国沙障研究进展与热点分析: 基于 Vosviewer 和 Citespace 的图谱量化分析[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 153-163.
Han Xueying, Wang Tao, Yang Wenbin, et al. Research progress and hotspot analysis of sand barrier in China quantitative analysis of atlas based on Vosviewer and Citespace [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 153-163.
- [23] Wiggs G F S. Desert dune dynamics and the evaluation of shear velocity: An integrated approach [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1993, 72(1): 37-46.
- [24] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Kalahari Desert [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(1): 19-34.
- [25] Sharratt B, Feng Guanglong. Friction velocity and aerodynamic roughness of conventional and undercutter tillage within the Columbia Plateau, USA [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(2): 236-241.
- [26] 王晨洋, 王玉杰, 袁立敏, 等. 不同形状沙袋沙障稳定性及防风效益[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 7-12.
Wang Chenfeng, Wang Yujie, Yuan Limin, et al. Stability and wind-break effect of sandbag barriers of different shapes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 7-12.
- [27] 齐之尧. 风的扰动度[J]. *内蒙古林业科技*, 1978, 4(4): 15-17.
Qi Zhiyao. Disturbance degree of wind [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 1978, 4(4): 15-17.
- [28] 朱泊年, 党晓宏, 蒙仲举, 等. 乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障防风固沙效益[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 431-437.
Zhu Bonian, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Effects of biodegradable poly lactic acid(PLA) sand barrier on wind prevention and sand fixation in Urumqi Sandy Land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 431-437.
- [29] 高天笑, 王涛, 杨文斌, 等. 低覆盖度羽翼袋沙障防风积沙效应的风洞试验[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 177-183.
Gao Tianxiao, Wang Tao, Yang Wenbin, et al. Wind tunnel experimental study on the effect of wind-proof and sand accumulation in low coverage wingbag sand barrier [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 177-183.
- [30] 王雨浩. 麦草、PLA 及其混合沙障防风固沙效益研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
Wang Yuhao. Study on the Benefits of wind and sand fixing of wheat straw poly lactic acid fiber and their mixed sand barriers [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Normal University, 2019.

- Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [25] Yao Yitong, Wang Xuhui, Zeng Zhenzhong, et al. The effect of afforestation on soil moisture content in North-eastern China [J]. PLoS One, 2016, 11(8):e0160776.
- [26] 赵洪利, 李军, 贾志宽, 等. 不同耕作方式对黄土高原旱地麦田土壤物理性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 17-21.
- Zhao Hongli, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Effect of different tillages on soil physical properties of dryland wheat field in the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 17-21.
- [27] 张邦彦, 何文寿, 李惠霞, 等. 粉垄与覆膜对宁南旱区土壤物理性状及马铃薯产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 27-37.
- Zhang Bangyan, He Wenshou, Li Huixia, et al. Effects of deep vertically rotary tillage and film mulching on soil physical properties and potato yield in the arid area of Southern Ningxia [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 27-37.
- [28] 牛庆花, 彭博, 陆贵巧, 等. 河北省坝上地区牧场防护林的防风效能研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 114-117, 24.
- Niu Qinghua, Peng Bo, Lu Guiqiao, et al. Windbreak efficiency of pasture shelterbelt in Bashang area of Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 114-117, 24.
- [29] 段娜, 刘芳, 徐军, 等. 乌兰布和沙漠不同结构防护林带的防风效能[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 125-129.
- Duan Na, Liu Fang, Xu Jun, et al. On defending effects of different forest belt structures in Ulan Buh Desert [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 125-129.
- [30] 王忠云, 宋燕平, 喻阳华, 等. 石漠化地区土壤含水率的动态变化特征及其影响因素[J]. 西南农业学报, 2021, 34(3): 591-596.
- Wang Zhongyun, Song Yanping, Yu Yanghua, et al. Dynamic change characteristics and influencing factors of soil moisture content in rocky desertification area [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(3): 591-596.
- [31] 史薪钰, 刘洋, 齐国辉, 等. 太行山片麻岩山地坡面土壤含水率及其影响因子: 以河北省阜平县为例[J]. 林业资源管理, 2015(3): 114-120.
- Shi Xinyu, Liu Yang, Qi Guohui, et al. Study on soil moisture content and its impact factors in Taihangshan low gneiss mountainous area: Take Fuping Country Hebei Province as an example [J]. Forest Resources Management, 2015(3): 114-120.
- ~~~~~
- (上接第 10 页)
- [31] 周娜, 张春来, 田金鹭, 等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2145-2156.
- Zhou Na, Zhang Chunlai, Tian Jinlu, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments [J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2145-2156.
- [32] 闫德仁, 杨制国, 高海燕, 等. 直压立式纱网沙障不同取样季节输沙量变化特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 129-134.
- Yan Deren, Yang Zhiguo, Gao Haiyan, et al. Variation characteristics of sediment transport for a vertical gauze sand barrier during different sampling seasons [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 129-134.
- [33] 方海燕, 屈建军, 俎瑞平, 等. 防沙工程的结皮效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 17-20.
- Fang Haiyan, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Research on effect of sand prevention and control engineering on formation of physical crust [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 17-20.
- [34] 虞毅. 沙袋沙障防沙治沙技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Yu Yi. Sandbag Sand Barrier Sand Prevention and Control Technology [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [35] 袁立敏, 黄海广, 闫德仁, 等. 不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 172-179.
- Yuan Limin, Huang Haiguang, Yan Deren, et al. Effect of wind-preventing and sand fixation of belt sand barrier under different degree of sand burial [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 172-179.